

# Surveillance acoustique des cavités à risque de fontis et d'effondrements localisés.

Charles-Édouard Nadim (INERIS), Emmanuelle Klein (INERIS), Cristina Occhiena (Politecnico di Torino), Julien de Rosny (Institut Langevin)

[charles-edouard.nadim@ineris.fr](mailto:charles-edouard.nadim@ineris.fr), [emmanuelle.klein@ineris.fr](mailto:emmanuelle.klein@ineris.fr), [cristina.occhiena@polito.it](mailto:cristina.occhiena@polito.it),  
[julien.derosny@espci.fr](mailto:julien.derosny@espci.fr)

## Summary

It is very difficult to monitor sinkholes and local collapses from underground using the classical geotechnical instrumentation since the location of such pre-existing phenomena cannot be easily approached or forecast in time in wide and complex underground cavities. INERIS developed and tested an acoustic method to detect, localize and characterize rock falls with the help of a few sensors.

## Introduction

Les cavités souterraines de faible profondeur, naturelles ou anthropiques, peuvent être à l'origine de risques de mouvements de terrains par fontis ou par effondrement localisé. Ce phénomène touche l'ensemble du territoire national.

Dans l'attente d'un traitement, une surveillance peut permettre de gérer le risque. Jusqu'à présent, cette surveillance était essentiellement réalisée par inspection visuelle et par instrumentation géotechnique conventionnelle. Cette démarche présentant plusieurs limites dans le suivi des phénomènes dans la continuité et d'exposition des équipes intervenantes, il était important d'examiner de nouvelles solutions instrumentales réunissant les conditions suivantes :

- permettre la caractérisation de l'évolution du fontis de manière précise et fiable ;
- avoir un rapport coût/bénéfice acceptable ;
- être suffisamment robuste pour offrir une qualité métrologique pérenne dans le temps ;
- limiter les besoins de maintenance ;
- installation rapide en conditions d'urgence.



*Fig. 1 : Chute de bloc dans la zone à risque d'effondrement de l'ancienne mine de fer de Moyeuvre-Grande (54).*

Dans le cadre d'une opération de recherche financée par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, le fond FEDER et la région Lorraine, l'INERIS a développé et testé la méthode d'écoute acoustique en collaboration avec GEODERIS, l'Institut Langevin et le Politecnico di Turin.

## Principe de l'écoute acoustique

La surveillance acoustique des risques fontis et les effondrements localisés est basée sur l'écoute permanente d'une cavité par un réseau de microphones pour détecter, enregistrer et caractériser les bruits liés à l'évolution du phénomène, typiquement des chutes de blocs. Les raisons du choix de la méthode acoustique pour détecter les chutes de blocs rocheux sont multiples :

- les chutes de blocs rocheux sont généralement des événements sonores. La méthode est cependant moins pertinente si le fontis évolue par très petites chutes de matériau ;
- beaucoup de cavités souterraines peuvent être qualifiées de milieu à « bas bruit », ou très peu perturbées, ce qui permet de détecter facilement une chute de blocs, de limiter les

enregistrements parasites et d'obtenir de bons rapports signal sur bruit lors d'un enregistrement ;

- la scrutation est continue dans le temps. De cette écoute continue peuvent être extraits et conservés les événements d'une certaine amplitude (principe de mesure passive) ;
- la mesure est « volumétrique » : contrairement à des mesures géotechniques ponctuelles, elle permet de détecter et de quantifier des phénomènes sur une étendue de cavité, plus ou moins importante selon les conditions.

En termes de performance, un réseau de microphones correctement dimensionné doit au strict minimum permettre d'enregistrer les chutes de blocs sur toute la zone d'intérêt. La taille des blocs susceptibles d'être détectés est dépendante de la distance aux capteurs : plus un réseau est dense plus il pourra détecter de petits blocs.

Dans le cas de cavités peu évolutives, un simple comptage peut suffire à s'assurer que les fontis surveillés n'évoluent pas de manière inhabituelle. Mais on peut également attendre de la surveillance acoustique qu'elle permette une localisation précise des sources ainsi que leur caractérisation, c'est-à-dire une évaluation de la taille des blocs tombés. Ainsi, même si un réseau est suffisamment dense pour qu'un microphone soit à proximité de chacune des zones à risque, il est souvent souhaitable que les chutes soient enregistrées par plusieurs capteurs si l'on souhaite pouvoir effectivement localiser avec précision et caractériser les événements

### Matériels employés

Le microphone est l'élément clé d'un réseau d'écoute acoustique, il doit répondre à diverses exigences et notamment avoir une excellente sensibilité et dynamique afin de permettre la détection d'événements de très faible amplitude. La résistance aux environnements difficiles est également essentielle, en particulier vis-à-vis de l'humidité, beaucoup de cavités présentant une hygrométrie élevée. Dans cette étude, des microphones Bruel & Kjaer (type 4188) sont utilisés et couplés à une carte de pré-amplification de l'INERIS.

Les microphones n'ont pas nécessité d'être couplés au massif et permettent une installation simple, soit depuis le fond, soit depuis le jour par simple pose en forage débouchant en galerie avec isolation phonique :

- les capteurs sont donc mobiles et récupérables permettant de modifier simplement un réseau de microphones selon une éventuelle évolution du besoin de la surveillance et le retour d'expérience ;
- la pose simple permet à la fois de réduire fortement le coût d'installation et le temps de présence en cavité ainsi que les perturbations sur un environnement souterrain parfois très dégradé, l'objectif étant de limiter au maximum l'exposition des équipes techniques en charge de l'installation.



Fig. 2 : Sonde microphonique installée sur un trépied (à gauche) et unité d'acquisition (à droite).

Une unité d'acquisition INERIS SYTGEM VLP permet de gérer l'acquisition localement ou par télégestion depuis le centre de surveillance de l'INERIS à Nancy grâce à une liaison sans fil 3G. Sa robustesse et son autonomie en énergie permette de la déployer indépendamment de toute infrastructure énergétique alors même que les microphones doivent être alimentés en continu. À titre indicatif, pour 8 voies de mesure en déclenchement la consommation est inférieure à 675 mW, ce qui donne environ 3 mois d'autonomie avec 4 batteries plomb de 100 Ah avec une dizaine de déclenchements journaliers.



### Localisation des événements

Les fontis et effondrements localisés sont par définition des phénomènes ponctuels. Ainsi, il est tout à fait primordial de pouvoir localiser les zones d'évolution. La précision attendue en termes de localisation sera dépendante de la présence et de la nature des enjeux en surface ou d'éventuels effets dominos redoutés, de la possibilité ou de l'impossibilité de constater l'évolution au fond, etc. Il pourra ainsi s'agir de localiser un événement à l'échelle d'une chambre de mine, d'un quartier ou simplement de valider que cet événement est bien issu de la zone surveillée. La capacité de localisation de chutes de blocs sera de ce fait fonction de la densité et de la répartition de capteurs ainsi que de la méthode de localisation mise en œuvre.

Quelle que soit la méthode choisie, la localisation repose sur le pointé précis des temps d'arrivée de l'onde sonore aux différents capteurs :

1. Une première approche extrêmement simple et fiable consiste à élaborer un abaque de l'ordre d'arrivée de l'onde acoustique aux capteurs à partir de mesures de calibrage (par exemple tirs au pistolet d'alarme). Pour tout nouvel événement, Il suffit alors de pointer l'ordre d'arrivée pour déterminer dans quelle zone il se situe. Cette méthode s'applique aux cavités simples ou complexes et accessibles par le fond ;
2. L'approche plus classique par inversion des temps d'arrivée aux capteurs nécessite de connaître les propriétés de propagation (notamment la vitesse) de l'onde acoustique dans l'air.
  - Dans le cas de cavités à géométrie homogène, comme une carrière en chambre et pilier régulière par exemple, il est possible de définir une vitesse de propagation équivalente, mesurée *in situ*, sans prise en compte du trajet réel de l'onde dans la cavité ;
  - Dans le cas d'une géométrie irrégulière la notion de vitesse équivalente n'est plus pertinente. Les trajets réellement empruntés par le front d'onde acoustique doivent être considérés, ce qui nécessite l'utilisation d'un modèle numérique de la géométrie de la cavité de manière à contraindre la propagation dans l'air.

Ces trois approches ont été testées en grand sur des sites expérimentaux. Le zonage simple a été réalisé grâce à une campagne d'une cinquantaine de tirs au pistolet d'alarme dans l'ancienne mine de Moyeuve-Grande, à géométrie plutôt homogène. Le zonage obtenu (zone de 100 m par 120 m) permet une localisation à l'échelle d'une chambre :

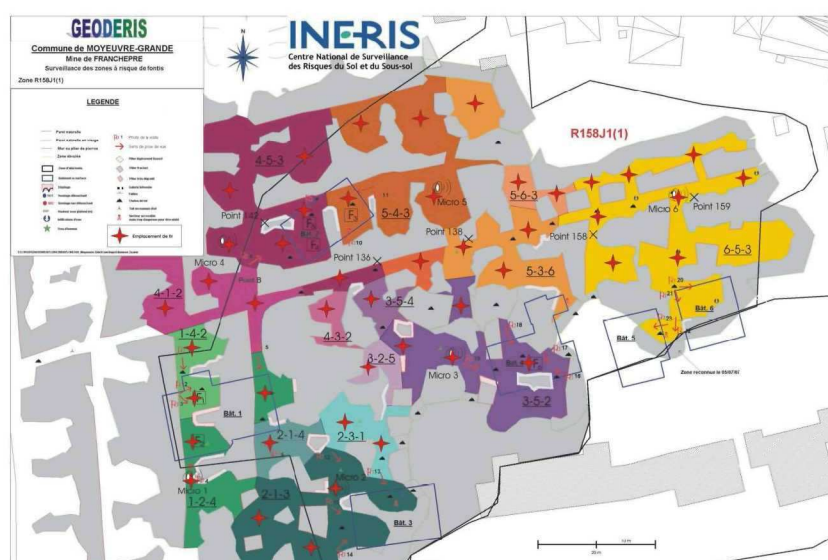


Fig 3 : Zonage des ordres d'arrivée aux trois premiers microphones lors d'une de tirs au pistolet dans la mine de Moyeuve (chaque triplet de microphones est affectée une couleur).

Un résultat comparable a été obtenu en exploitant les localisations par inversion (milieu équivalent, puis trajets en galeries) : une erreur moyenne de 6 m a été obtenue avec les deux méthodes sur des simulations de chute de bloc rocheux d'une centaine de kilogrammes.

Dans le cas d'une seconde mine instrumentée (Côte d'Hayange) présentant une géométrie plus filante et hétérogène, la méthode d'inversion en trajets en galeries donne de bien meilleurs résultats (3 m) que l'inversion en milieu équivalent (13 m) :

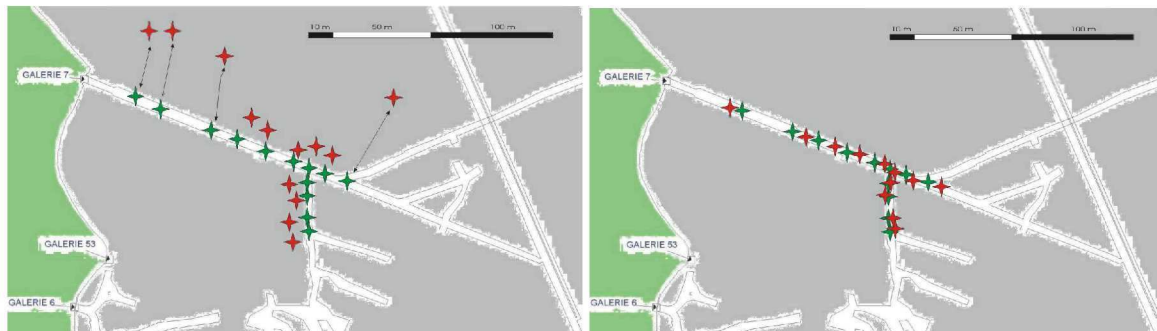


Fig. 4 : Localisation (étoiles rouges) de simulations de chute de bloc (~100 kg – étoiles vertes) dans la mine Côte d'Hayange par inversion en trajets directs (à gauche) et en trajets en galeries (à droite).

Compte-tenu de la géométrie de la zone surveillée (deux galeries filantes perpendiculaires) l'hypothèse de trajets rectilignes avec vitesse équivalente induit des erreurs fortes, notamment en périphérie du réseau de microphones. La localisation en trajets en galerie, nécessitant un modèle simple des galeries, s'avère bien plus performante.

### Retour d'expérience

L'INERIS réalise une surveillance opérationnelle de plusieurs sites à risque de fontis ou d'effondrements localisés par méthode acoustique (mine de fer, mine de sel, carrières).

À titre d'exemple, la mine de Moyeuve-Grande a été surveillée à titre expérimental, puis opérationnel, durant plus de 3 ans. Un critère simple a été mis en place pour décider d'un éventuel constat sur place : plus de 10 événements successifs sur 24h glissantes et dans une même zone ou un événement significatif en amplitude (> 90 dB sur deux microphones). Une trentaine de petites chutes de bloc rocheux a été enregistrée durant cette période. Elles ont été localisées dans différentes zones de la mine. Leur faible importance et leur dispersion ont permis de s'assurer de l'absence d'évolution dangereuse de la cavité, et donc de supprimer les visites d'inspection tout en maintenant les populations sus-jacentes en place (6 habitations).

L'écoute acoustique est donc considérée comme une méthode efficace de surveillance des risques fontis et effondrement localisé, lorsque les principales conditions d'applicabilité sont réunies : la cavité doit être silencieuse, les phénomènes doivent être à un stade précoce d'évolution et le réseau correctement dimensionné pour couvrir efficacement l'ensemble de la zone de surveillance.

### Références

- Nadim C. (2013). Méthodologie d'instrumentation d'une cavité souterraine pour la surveillance du risque de fontis par méthode acoustique, Rapport INERIS DRS-13-135992-01259A.
- Lambert C., Salmon R. (2007). Évaluation et traitement du risque de fontis lié à l'exploitation minière, Rapport INERIS DRS-07-86090-05803A.
- Fink M. (2007). Ondes et acoustique. Cours d'acoustique de l'École de Physique et de Chimie de Paris.
- Lomax, A., Michelini A., Curtis A. (2009), Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods, in Complexity In Encyclopedia of Complexity and System Science, Part 5, Springer, New York, pp. 2449-2473, doi:10.1007/978-0-387-30440-3.

### Mots clés

Fontis, effondrement localisé, surveillance, acoustique, risque.